

長期材齢コンクリートの耐久性評価

－実態調査資料のまとめ－

川上 英男* 脇 敬一** 多田 真由美***

Evaluation of Durability of Old Building Concrete

－Analysis of Investigation Results－

Hideo KAWAKAMI, Keiichi WAKI, and Mayumi TADA

(Received Feb. 28, 1995)

Investigations were carried out on the durability of 41 reinforced concrete buildings. The most of them were located in Hokuriku district of central Japan. These buildings were 6–66 years old. The carbonation depth, carbonation speed and compressive strength of concrete were discussed based on these investigated results.

The summaries are as follows:

- 1) The range of compressive strength of concrete was 96–378 kgf/cm².
- 2) Carbonation depth of concrete at inside of the building was found to be three times of the value expected by the proposed estimation formula.
- 3) Carbonation depth at outside of the building was shown about the same values with the formula's.
- 4) Carbonation depth was found to be decreased with increased compressive strength of concrete. Increasing of compressive strength is more effective to decrease the carbonation speed of concrete at outside of the building than at the inside.

1. まえがき

我が国においては、鉄筋コンクリート造建物は増加の一途を辿り、そのストックは現在膨大なものとなっている。従来、鉄筋コンクリート造建物は耐久性に優れたものとの社会的評価がなされていた。しかしながら、新築後、年月の経過と共にコンクリート中の鉄筋の腐食に起因する劣化現象が顕在化し、耐久性の確保が疑問視されるもの、あるいは耐用限度に達したと見做されるものが増えて来ている。

この鉄筋の腐食に起因する劣化現象の主たる原因として、コンクリートの中性化が挙げられる。コンクリートはその水和の過程で水酸化石灰を生じ、これがアルカリ性を呈するため、

* , ** , *** 環境設計工学科

コンクリート中の鉄筋は通常は錆びない状況にある。ところが、長期間の間にこの水酸化石灰は空気中の炭酸ガスと反応し、炭酸カルシウムに変化し、その結果アルカリ性を失う。すなわち鉄筋を錆びから防護する働きを失う。この現象を中性化という。コンクリート表面から中性化が進行し、鉄筋位置まで到達すると、コンクリート中に浸透した酸素と水分によって鉄筋が腐食しやすくなる。腐食が進行すると、鉄筋は膨張し、周囲のコンクリートを押し広げ、コンクリートにはひび割れが入る。このひび割れから空気と水分が侵入しやすくなるため、腐食は加速される。鉄筋コンクリートの劣化はこのように進行し、耐久性が失われることになる。

建物の耐用年数の向上には、新築当初の耐久設計と入念な施工が決め手であり、また経年に伴って、その耐久性の診断を行ない、中性化の現状を把握すると共に、必要な補修を的確に行なうことが大切である。個々の鉄筋コンクリート造建物の劣化には、コンクリートの材質、仕上げ材の防護効果の他、気候条件など多様な影響因子がある。したがって、劣化現象の要因とその影響の把握には自然条件下にある既存建物の実態調査が重要となってくる。

筆者らは現在まで主として公的機関の依頼により、長期間にわたって鉄筋コンクリート造建物の耐久性診断を実施してきた。それらの多くはその都度、福井大学工学部研究報告その他に報告してきた。本論文はそれらの調査結果の中から、コンクリートの中性化深さ、材齢、仕上げおよび圧縮強度に焦点を絞り、中性化の要因とその影響について考察したものである。

2 調査対象と調査方法

2.1 調査対象

調査建物は、鉄筋コンクリート造建物41件で、その概要を表1に、それらの内訳を図1に示す。それらの建物は、1921年（大正10年）から1973年（昭和48年）の間に竣工し、一般環境下にあったものである。その竣工から調査時点までの経過年数は6-66年の範囲にある。

中性化深さの調査データの内、検討の対象としたのは、部材としては柱と壁、仕上げの種類としては、仕上げなし、シッキイ仕上げ、モルタル仕上げ 及びモルタル下地シッキイ仕上げの4種類で、その他は解析対象から除外した。又、コンクリートコア圧縮強度を中性化に影響を及ぼす要因として取り上げた。

中性化深さのデータ数は総数666で、調査建物1件当たりの平均は16個であった。中性化深さの調査箇所の内訳を図2に示す。全調査箇所の内、屋内が58%、屋外が42%であった。屋内では、モルタル下地シッキイ仕上げが31%と最も多く、次いで、シッキイ仕上げ、モルタル仕上げ、仕上げなし（腰板張りを含む）の順である。何らかの仕上げが施されていた箇所は85%であった。

2.2 調査方法

中性化深さの調査は、現場において、コンクリートをはつり取った穴に対して行なう方法と抜き取りコンクリートコアによる方法の2種類である。いずれもフェノールフタレインのアルコール1%溶液をスプレーでコンクリートに散布し、表面から赤色反応部までの深さを4箇所

表1 調査建物概要

No.	名 称	竣 工 年	経過年数	所 在 地	建築物用途	階 数	テータ数		はつり数		コア数		
							外	内	計	内	外	内	外
1	福井大学図書館蔵書庫	1927	40	福 井 県	蔵 書 庫	F3	5	0	5	—	5	—	0
2	福井電報局蔵庫	1959	7	福 井 県	蔵 庫	1	12	28	40	28	12	0	0
3	福井大学図書蔵書庫実設室	1925	43	福 井 県	実 設 室	1	20	21	41	20	21	0	0
4-1	福井大学図書館工庫	1925	43	福 井 県	工 庫	1	12	14	26	12	14	0	0
4-2	福井大学図書館工庫外壁	1928	40	福 井 県	工 庫	1	4	4	8	4	4	0	0
5	福井市庁舎旧館	1935	40	福 井 県	市 庁 舎	3	0	28	28	28	—	0	—
6	福井県庁舎本館	1922	54	福 井 県	県 庁 舎	3	3	31	34	20	3	11	0
7	福井県国庫金庫本館	1922	54	福 井 県	国 庫 金 庫	3	0	6	6	6	—	0	—
8	七宝小学校校舎	1930	42.5	石 川 県	小 学 校	1	10	0	10	—	10	—	0
9	松任小学校校舎	1924	50	石 川 県	小 学 校	3	0	10	10	10	—	0	—
10	福井大学図書館	1927	56	福 井 県	蔵 書 庫	2	0	32	32	21	—	11	—
11-1	金石中学校体育館	1954	28	石 川 県	体 育 館	1	14	7	21	0	7	7	7
11-2	安田中学校体育館	1954	28	石 川 県	体 育 館	1	11	5	16	0	6	5	5
12-1	高岡中学校校舎及び体育館	1930	44	石 川 県	校 舎、体 育 館	3, 2	0	15	15	15	—	0	0
12-2	福井小学校体育館	1930	49	石 川 県	体 育 館	1	5	0	5	—	5	—	0
13-1	十一里小学校校舎内運動場	1932	42	石 川 県	体 育 館	1	4	2	6	2	4	0	0
13-2	羽野小学校体育館	1928	47	石 川 県	体 育 館	1	6	5	11	5	6	0	0
13-3	新富町小学校校舎内運動場	1930	47	石 川 県	体 育 館	1	0	4	4	4	—	0	—
14-1	馬場小学校校舎内運動場	1930	47	石 川 県	体 育 館	1	0	4	4	4	—	0	—
14-2	野町小学校校舎内運動場	1931	46	石 川 県	体 育 館	1	2	4	6	4	2	0	0
14-3	福川小学校校舎内運動場	1930	48	石 川 県	体 育 館	1	2	4	6	4	2	0	0
14-4	芳賀町小学校校舎内運動場	1931	47	石 川 県	体 育 館	1	0	4	4	4	—	0	—
15-1	金山町小学校校舎内運動場	1932	47	石 川 県	体 育 館	1	4	0	4	—	4	0	0
15-2	奥田町小学校校舎内運動場	1932	44	石 川 県	体 育 館	1	2	3	5	3	2	0	0
16	奥田小学校校舎	1935	45	石 川 県	校 舎	3	8	7	15	0	0	7	8
17	奥田高等学校	1937	43	石 川 県	校 舎	F3	41	0	41	—	41	—	0
18-1	野田中学校体育館	1954	25	石 川 県	体 育 館	1	4	4	8	4	4	0	0
18-2	浅野川中学校体育館	1954	26	石 川 県	体 育 館	1	6	3	9	3	6	0	0
18-3	伊野小学校校舎	1957	23	石 川 県	校 舎	2	3	4	7	4	3	0	0
18-4	高松中学校体育館	1953	26	石 川 県	体 育 館	1	5	0	5	—	5	—	0
19-1	能登郡小学校校舎、体育館	1928	59	石 川 県	校 舎、体 育 館	3、1	9	42	51	22	4	20	5
19-2	昭和会館	1930	46	福 井 県	公 会 堂	3	0	4	4	4	—	0	—
20	福井市足羽浄水場	1921	66	福 井 県	浄 水 場	1	4	7	11	0	0	7	4
21	ONY無線中継所	1973	6	大 阪 府	無線中継所	3	21	0	21	—	21	—	0
22	福井交機局	1972	7	福 井 県	機 械 室	1	15	0	15	—	13	—	2
23	平和町アパート2棟	1953	27	石 川 県	アパ-ト	3	14	28	42	28	14	0	0
24	IKビル	1923	58	石 川 県	事 務 所	3	11	27	38	0	11	27	0
25	笠置中学校	1954	28	石 川 県	小 学 校	1	5	7	12	7	5	0	0
26	TACHI3号棟	1963	22	福 井 県	アパ-ト	4	19	21	40	9	7	12	12

竣 工 年	60以後
1920年 ~ 1939年	40 ~ 59

経 過 年	61年 ~
~10年	31 ~ 40
21 ~ 30年	41年 ~ 50年
51年 ~ 60年	

建 物 種 別		
体 育 館	教 育 施 設	そ の 他

住宅

全 体	屋内外別
屋 内 (385)	屋 外 (281)

屋 内		仕 上 げ 別	
仕上げなし (59)	シックイ (92)	モルタル (85)	モルタル+シックイ (121)

		その他(28)	
屋 外	仕 上 げ 別		
仕上げなし (70)	モルタル (190)		

その他(28)

その他(21)

図1 調査建物内訳

図2 調査箇所・仕上げ内訳

測定して、その平均値をもって、中性化深さとした。

3 調査結果の解析と考察

中性化深さの測定値にはバラツキがあるため、ここでは、同一条件下（建物別、屋内屋外別、仕上げ材別）においてその測定値が4個以上（最大41個）あるものについて、平均値を求め、その建物における平均中性化深さとし、これらの平均中性化深さをを用いて各種要因の影響を検討する。また、建物ごとの区別をせず、個々のデータの全部を一括した場合についても考察を行なった。

3.1 経過年数と中性化深さの関係

建物の経過年数と平均中性化深さとの関係を、屋内屋外別および仕上げ材別に図3および図4に示す。いずれの場合においても、経過年数が大きくなるにしたがって、平均中性化深さが大きくなる傾向があるが、その関係は建物間で差がある。これは建物ごとにコンクリートの品質や仕上げ材の材質及び施工程度が異なること、及び局地的環境条件が同一でないことが主たる理由と考えられる。

中性化速度式としては岸谷式[1]が最もよく知られており、次の式で示される。

$$y = 0.3(1.15 + 3W)x^2 / R^2(W - 0.25)^2 \quad (W \geq 0.6) \quad \text{----- (1)}$$

$$y = 7.2x^2 / R^2(4.6W - 1.76)^2 \quad (W \leq 0.6) \quad \text{----- (2)}$$

（y：経過年数、 W：水セメント比、 x：中性化深さ（mm）、 R：中性化比率）

ここに中性化比率Rは、骨材、表面活性剤およびセメントの種類によって定まる定数である。

中性化深さを測定したコンクリートの水セメント比が明らかでないが、後述のコンクリート圧縮強度から水セメント比は60%以上と考え、式（2）における $R=1$ 、 $W=0.6$ の場合の式（3）と比較した。

$$y = 7.2 X^2 \quad \text{----- (3)}$$

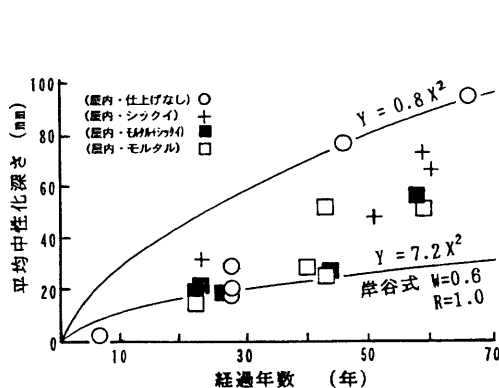


図3 建物内部平均中性化深さと経過年数

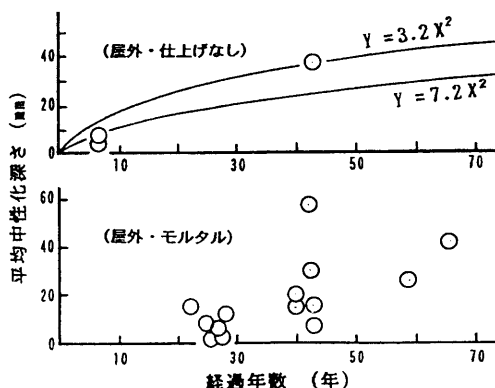


図4 外部平均中性化深さと経過年数

本調査結果の屋内屋外の仕上げなしの場合について、建物ごとの経過年数と平均中性化深さの関係の上下限を同図に記入した。建物外部では、中性化深さは式(3)で得られる値とはほぼ一致するが、内部では、0.29 - 3.1 倍の値を示している。

3.2 中性化に及ぼす各種要因とその影響

a) 環境条件の影響

モルタル仕上げの場合について、同一建物での屋内屋外の中性化深さを図5に示す。この場合、モルタルの厚さは考慮に入れてない。中性化深さは、屋内の方が屋外より大きく、その倍率は1-4.3倍で平均2.7倍であった。日本建築学会標準仕様書 JASS 5 [2]では屋内の中性化深さは、屋外の中性化深さの 1.5 - 3.0 倍であると解説されており、本調査結果はその内容とはほぼ一致する。

一般にコンクリート中の水分含有量が多くなると、コンクリートの透気性が低下することが知られている[3]。屋内のコンクリートは常に乾燥環境下にあるのに対して、屋外のコンクリートは雨がかかるので、水分含有量は屋内より高く、炭酸ガスのコンクリート中への拡散速度も小さくなるものとみなされる。また、炭酸ガス濃度が高い雰囲気にあるほど中性化速度は大きくなる[4]。屋内の炭酸ガス濃度は約 0.1 %、それに対して屋外では 0.03 % と言われている[5]。このような理由から通常屋内の中性化深さは屋外よりも大きくなる。

一方、炭酸ガス以外の化学的物質がコンクリートのアルカリ性を損なうことがある。たとえば同じ屋内でも車庫では中性化深さは、その他の場合の約3倍となっている。これは自動車の排気ガス(亜硫酸ガス)がコンクリートの中性化に及ぼす影響が大きいことを示している。以上のように、環境条件が中性化に及ぼす影響は非常に大きく、同じコンクリートであっても、置かれている環境によって、中性化深さは大きく異なったものとなる。

b) 仕上げ材の影響

本調査ではモルタル仕上げ厚さは、4-43 mm、モルタル下地シックイ仕上げではモルタル厚さ 2-55 mmの上に、シックイ仕上げ厚さが 2-27 mm、シックイだけの仕上げの場合はその厚さは 5-51mm程度であった。屋内の仕上げ材の種類が比較的多かった建物について仕上げ材別の中性化深さの平均とその範囲をそれぞれの建物ごとに図6に示す。各データ数は2-11

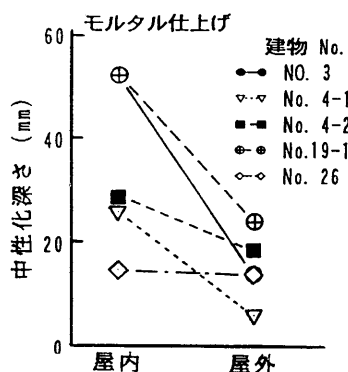


図5 屋内と屋外の中性化深さ

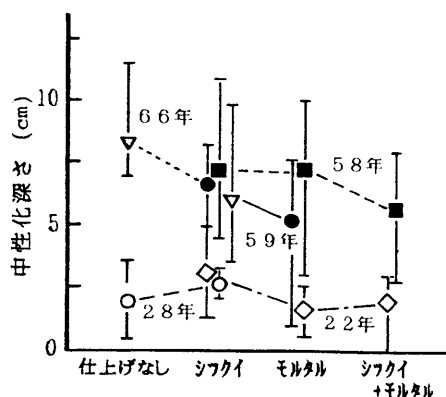


図6 仕上げの種類と中性化深さ

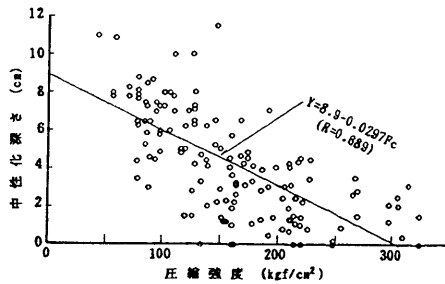


図7 圧縮強度とコンクリートの中性化深さ

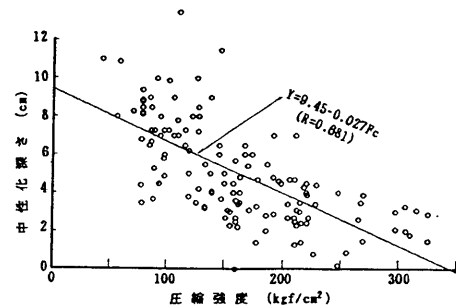


図8 圧縮強度と(コンクリート+モルタル)の中性化深さ

である。同一建物でモルタル仕上げが施されていると、平均中性化深さは小さくなる傾向にある。すなわち、モルタルの中性化抑制効果が認められる。この傾向は経過年数の大きい建物において顕著である。

c) コンクリート圧縮強度の影響

中性化速度はコンクリートの圧縮強度と相関性があるという実験結果が報告されている[1]。また、筆者らは前報[6]で、同一建物において圧縮強度が増加するほど、中性化深さが直線的に減少している調査結果を報告した。図7と図8に屋内コンクリートの圧縮強度(F_c)と中性化深さの関係を示す。このように多数の建物のデータを一括した場合においても、全般的傾向として圧縮強度が大きくなるほど中性化深さは減少していることが明らかとなった。

さらに、この図7の資料に経過年数の要因を取り入れて、実際の建物における中性化速度と圧縮強度の関係について検討する。前記の中性化速度式を一般化し、中性化深さと経過年数の関係を式(4)で表す。

$$y = \alpha x^2 \quad \text{----- (4)}$$

(y: 経過年数、 x: 中性化深さ(cm)、 α : 定数)

この定数 α は中性化のしやすさを表し、 α の値が小さくなるほど同じ中性化深さに達する期間 y が小さくなり、中性化が早く進行することを意味する。これはまた、中性化深さは経過時間の平方根に比例して大きくなるという“時間の平方根則”で表されることを意味する。そこで式(4)を式(5)のように表すことにする。

$$\sqrt{y} = \sqrt{\alpha} x \quad \text{----- (5)}$$

この $\sqrt{\alpha}$ と圧縮強度の関係を示したのが、図9 - 図12である。

データのバラツキはあるが、圧縮強度が大きくなると、定数 $\sqrt{\alpha}$ はほぼ直線的に大きくなる、すなわち中性化速度は小さくなる傾向が認められる。同図に回帰直線の式と相関係数を記入した。その回帰直線の勾配を、屋内と屋外で比較すると、屋外の方が屋内に比べて大きい。すなわち、圧縮強度の増大が中性化抑制効果に及ぼす影響は屋外の方が屋内より大きく、効果的であることを示している。

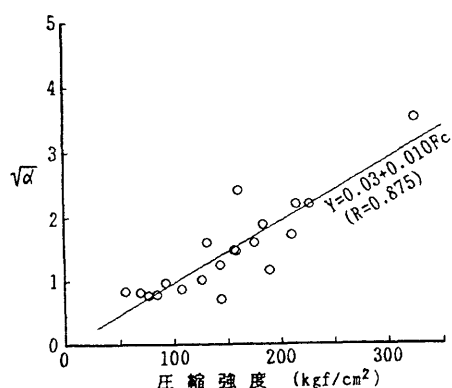


図9 圧縮強度と $\sqrt{\alpha}$
(内部コンクリートの中性化)

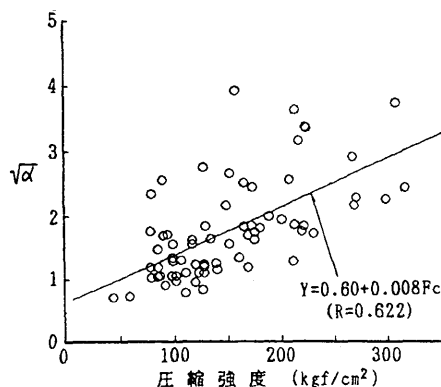


図10 圧縮強度と $\sqrt{\alpha}$
(内部コンクリートとモルタルの中性化)

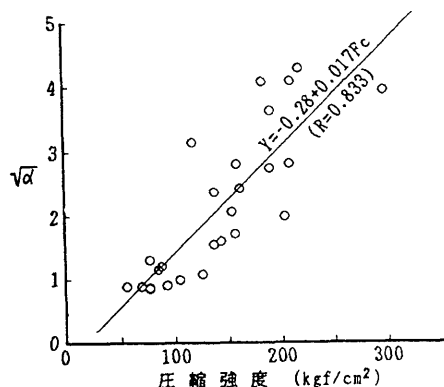


図11 圧縮強度と $\sqrt{\alpha}$
(外部コンクリートの中性化)

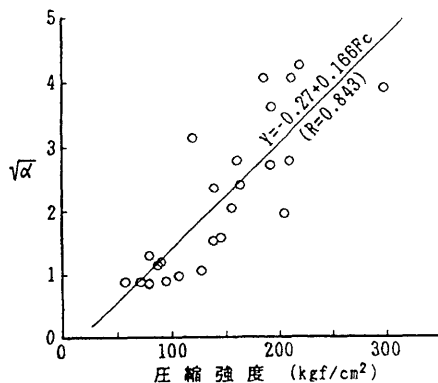


図12 圧縮強度と $\sqrt{\alpha}$
(外部のコンクリートとモルタルの中性化)

4 むすび

本論文の検討対象は、北陸地方の一般環境下にある鉄筋コンクリート造建物で、コンクリートの材齢は、6-66年、建物ごとの平均圧縮強度は 96-378 kgf/cm² の範囲である。仕上げの種類はモルタル下地シックイ仕上げ、モルタル仕上げ、シックイ仕上げ および仕上げなしの4種類である。コンクリートの中性化について明らかになった点は次のようである。

- 1) 建物外部の中性化深さは従来の中性化深さに関する推定式で得られる値とはほぼ同程度であった。屋内の中性化深さは最大その3倍に達していた。
- 2) 中性化深さはモルタル仕上げを含む方がそれ以外の場合に比べて小さくなる傾向が見られた。
- 3) コンクリートの圧縮強度が大きい程、中性化深さは小さく、両者はほぼ直線的関係にある。

- 4) 中性化速度を”時間の平方根則”で表すと、中性化深さの係数 $\sqrt{\alpha}$ は、圧縮強度が大きい程大きく、中性化抑制効果が大きいことを示した。両者は一次的関係にある。

謝辞

調査に当たっては、建物の所有者及び管理担当の方々のご支援とご協力を頂いた。又、それぞれの調査においては当時の学生諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岸谷孝一”鉄筋コンクリートの耐久性” 鹿島建設技術研究所出版部、昭和38年
- 2) 日本建築学会標準仕様書、同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 1991
- 3) 笠井芳夫、松井勇：モルタルの透気性に関する試験、セメント、コンクリート、
No. 436, pp. 8-15, 1983. 6
- 4) 柳 啓他5名：コンクリートの中性化進行予測に関する実験（その2. 中性化速度に及ぼす水セメント比、炭酸ガス濃度の影響） 日本建築学会大会学術講演梗概集、
pp. 247-248, 昭和62年10月報告集, 1983
- 5) 日本建築学会標準仕様書、同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, pp. 226, 昭和50年5月
- 6) 川上英男, 脇敬一：長期材齢コンクリートの調査研究（21. 旧福井市外電話局及びI Kビル、福井大学工学部研究報告、第43巻、No. 2, 1995. 3